

연축전지 기판 격자의 고속 전단성형공정 해석적 연구

김대성*, 정종윤**, 조형찬***, 이춘만#

Analytical study on High speed Shear forming Process of Lead-acid Battery Grids

Dae-sung Kim*, Jong-jun Jung**, Hyung-chan Cho*** and Choon-man Lee#

ABSTRACT

This study has been focused on the analysis of high speed shear forming process for lead-acid battery grids. The grid plays an important role of electrical charge. It is necessary to ensure the best battery's performance that the grid should have a best quality. The clearance between punch and die, the velocity of punch and the critical damage value are very important parameters for making a good grid form. The finite element analysis of the shear forming process is carried out by measuring and optimizing these three important parameters. The result of this study concludes that these parameters has a great influence on grid quality.

Key Words : Lead-acid Battery(연축전지), Manufacturing of Grids for Battery(기판제조), Shear Forming(전단성형), Sheet Metal Forming(판재가공), Ductile Fracture(연성파괴), FEM(Finite element method : 유한요소법)

1. 서론

최근 첨단 통신 관련 산업의 급속한 발전으로 인하여 첨단 OA 및 HA의 비상 전원을 지원하는 연축전지¹⁾의 수요가 급증하고 있는 추세이다. 연축전지는 통신 산업용 장비의 비상 전원 공급용으로 쓰이는 필수 요소로서 발전소, 통신기기, 소방설비, UPS, 이동통신 기지국 등에 다양하게 사용되고 있다. 연축전지는 비상시 양질의 우수한 에너지를 공급할 수 있어야 하며, 미세한 전류 변화에도 민감하게 대응할 수 있어야 하기 때문에 최고의 품질을

만족할 수 있는 제품 생산이 생명이라 할 수 있다. 연축전지 시스템에서 성능을 좌우하는 핵심 부품은 전기를 축적하는 기판으로서 재질은 납(Pb)으로 되어 있으며 규격(6V, 12V, 20V)에 따라 기판의 구성 수량이 달라진다. 재질의 특성상 연성이 강하여 기계 가공에 의한 제조공법이 까다로워 대부분 국내의 배터리 제조 업체에서는 Fig. 1(a)에서 보여주는 바와 같이 중력주조공법에 의하여 생산되고 있다. 이러한 중력주조공법은 공법상의 특성상 생산성이 결여되고 있다. 또한 주조시 관로를 통한 소재(Pb) 공급이 원활하게 이루어지지 않아, 기판 구성의

¹⁾ 접수일: 2005년 1월 17일; 게재승인일: 2006년 1월 13일

* 창원대학교 기계설계공학과 대학원

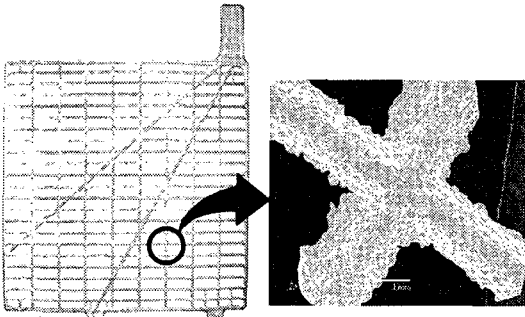
** 창원대학교 산업시스템공학과

*** 창원대학교 산업시스템공학과 대학원

교신저자: 창원대학교 기계설계공학과

E-mail cmlee@sarim.changwon.ac.kr Tel. (055) 279-7572

프레임(Frame)을 다변화하지 못하여 초기 충전시 균일한 충전이 이루어지지 않는다. 이는 배터리의 수명을 단축시키는 주요인이 되며, 장착된 현상에서의 교환 등 A/S 문제가 많이 발생하고 있다. 또한 주조 공정에서 발생된 단면부의 버(Burr) 발생으로 후속 공정인 납 도금 과정에서 전해액(성분:황산) 투입시 버 성장으로 전기쇼트의 원인이 되며, 배터리 성능을 잃게 하는 치명적인 결함을 내포하고 있다. Fig. 1(b)는 주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope)을 통해 중력주조공법으로 제조된 배터리 격자 일부를 18배율로 확대한 사진이다. 이 사진에서도 격자 주위에 불규칙적인 버가 생성되어 있음을 확인할 수 있다.



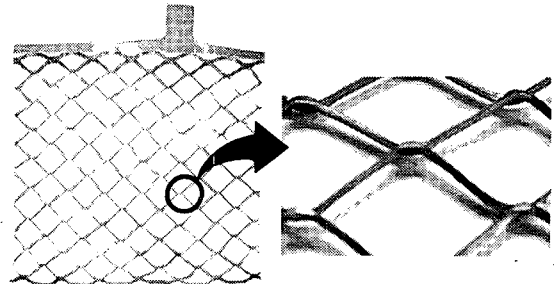
(a) Square mesh grid (b) SEM photographic at 18x
Fig. 1 Grid for lead-acid battery by gravity casting

최근 첨단통신산업 관련 수요가 증가함에 따라 상기의 문제점을 보완할 수 있는 새로운 공법의 필요성이 대두되고 있으며 해외선진국의 일부업체에서는 주조공법을 탈피한 가공기술을 개발하여 배터리 관련 산업의 경쟁력을 강화시키고 있다. 본 연구에서 제시한 전단가공 방법은 경량의 제품 및 치수 정밀도가 우수한 형상의 제품을 얻을 수 있으며, 대량 생산 및 가공의 자동화를 이루기 쉽고 가공시간 및 노동력이 적게 드는 가공 방법이다. 코일(Coil) 상태의 원재를 가공함으로써 소재의 낭비를 줄이고, 기존 제품의 치명적인 결함인 버 성장을 완전 제거할 수 있어 품질과 생산성을 동시에 2배 이상 향상시킬 수 있는 공법이다. 이에 본 연구에서는 전단성형가공을 이용한 연속전지 기판 격자의 생성 방법 및 전단성형가공의 해석적 방법과 전단성형가공 조건 변수에 따른 특성을 파악하고자 한다.

2. 연속전지 격자의 구조와 제조 공정

2.1 연속전지 격자의 구조

기존 기판은 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 사각 격자(Square mesh grid)의 형상이다. 이를 Fig. 2(a)와 같이 다이아몬드 격자(Diamond mesh grid)로 바꿈으로써 인해 전기가 상부에서 하부로 흐를 때 더 원활히 흐를 수 있도록 개선하였다. 또한 Fig. 2(b)에서 보여주듯이 격자 와이어(Grid wire)를 꼬임 설계로 하여 배터리 기판 제조의 후기 공정인 전해액을 격자 사이에 채울 때 전해액이 잘 떨어 지지 않게 하는 특성을 가지도록 했다.



(a) Diamond mesh grid (b) Grid wire
Fig. 2 Grid for lead-acid battery by shear forming

2.2 연속전지 격자의 제조 공정

금형은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 상부 다이(upper die)에 양쪽으로 펀치(Punch)가 21개씩 42개가 달려 있다. 소재는 Fig. 4에서 화살표 방향으로 상부 다이의 펀치 밑을 지나면서 21번의 프레스(Press)²⁾ 공정을 거쳐 Fig. 5와 같은 기판을 제조하게 된다.

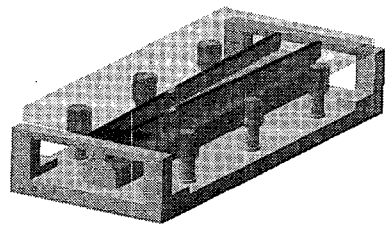


Fig. 3 Modeling of Press Die

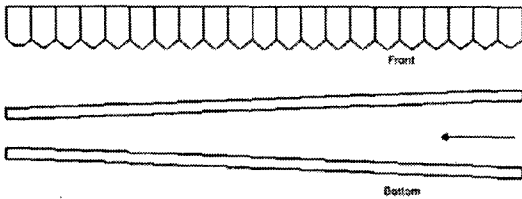


Fig. 4 Cutter of upper die

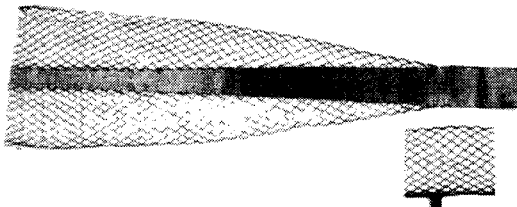


Fig. 5 Diamond mesh grid

Fig. 6은 연속 작업시 17번의 타발로 생성될 수 있는 격자 모양을 보이고 있다. 소재가 Fig. 4의 화살표 방향으로 상부 다이 밑을 지나 갈 때 격자는 Fig. 6의 1, 2, 3, 4 순에 의해 생성이 되어진다.

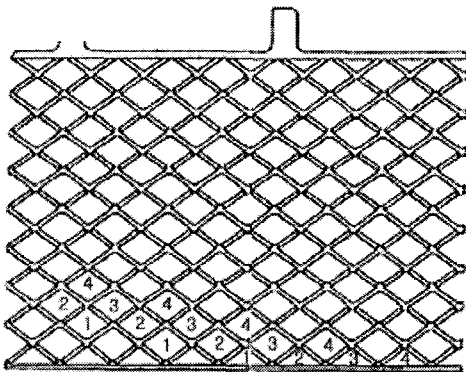


Fig. 6 Process of shear forming

위의 기본 개념을 이용하여 여러 가지 설계 변수에 따른 금형 형상 치수 자동 생성 프로그램을 개발하였다. 입력 변수는 격자 각 요소의 치수로 두었으며 출력 값은 펀치의 폭, 길이, 전단 폭, 펀치 날의 각도 이다. 본 연구에서 제시된 방법은 주조 공법과 달리 격자 치수를 다변화 할 수 있어, 각각의 펀치 설계 값을 연속으로 얻을 수 있게 프로그램 하였다. Fig. 7에서는 개발된 프로그램을 보여 주고 있다.

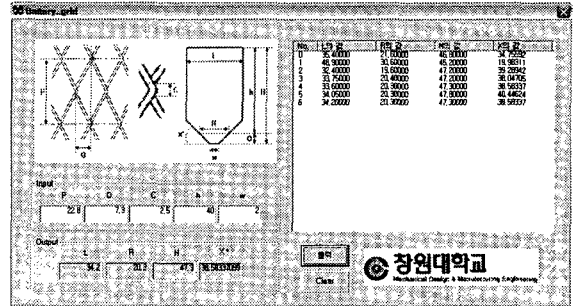


Fig. 7 Battery grid design program

3. 격자 전단성형가공의 해석

일반적으로 전단성형가공은 전단속도, 펀치와 다이(Die)의 클리어런스(Clearance)에 영향³을 받으며, 전단성형가공을 이해하고 해석할 수 있는 방법의 확립이 필요하다. 본 연구에서는 전단성형가공을 보다 실제에 적합하게 해석하기 위하여 소성가공 문제의 해석에 널리 적용되고 있는 상용 유한요소코드인 DEFORM을 이용하여 전단가공 공정을 3D로 해석하였다.

3.1 연성파단

소성가공중의 금속의 파괴는 대개 피로적인 연성파단이다. 이러한 파괴는 소재에 가해지는 변형이 소재의 변형한계를 초과하게 될 경우 발생한다. 연성파단의 예측을 위하여 많은 이론이 제시되어 있으며, 본 연구에서는 수정된 Cockcroft-Latham⁴의 파괴조건 식(1)을 이용하였다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\sigma} d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

여기서 σ^* 는 최대 인장 주응력, $\bar{\sigma}$ 는 유동 응력, $\bar{\epsilon}$ 는 유효 변형량, C 는 연성파단 값(Critical damage value)이며 실험에 의해 구해진다. 이 조건은 파괴가 변형과 인장응력에 의존함을 의미하고 있다. 위에서 언급된 재료 상수 값은 원통형 시편의 인장 실험⁵을 통해 구할 수 있으나 소재가 판재인 경우 원통형 시편의 인장 실험이 현실상 힘들다. 본 연구에서는 전단가공을 선행하여 소재의 단면을 분석하였으며, 파괴가 시작되는 지점과 DEFORM에 의

한 유한요소해석으로 유사 지점에서 연성파단 값을 도출해 내고자 하였다.

3.2 전단성형가공

전단성형가공은 기계식 25톤(Ton) 프레스로 수행하였으며, 가공조건은 250spm(Stroke per minute), 행정(Stroke) 30mm로 하였다. 소재는 1mm 납축 전지용 납띠를 사용하였다.

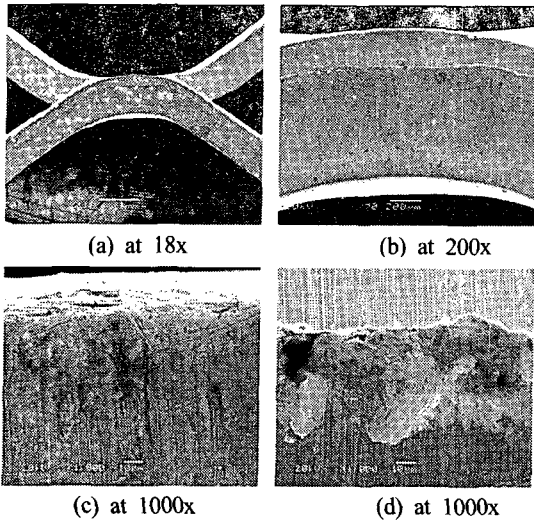


Fig. 8 SEM photographs of shear plane

Fig. 8은 주사전자현미경으로 전단성형가공 후 소재의 전단면을 촬영한 것이다. Fig. 8(b)를 보면 전단면의 특성이 뚜렷이 나타난다. 위에서 1/4지점까지는 눌린면(Shear droop)² 1/3이하 지점부터는 전단면(Shear plane)²과 파단면(Fracture)²의 순으로 구분된다. Fig. 8(c)의 경우 눌린면을 1000배율로 확대한 사진이다. Fig. 8(d)는 눌린면과 전단면의 경계지점으로 위에서 1/3지점까지 상부 다이가 내려오면서 늘어난 소재들이 경계면을 기준으로 더 이상 늘어나지 않고 전단되는 것을 보이고 있다. 본 연구에서는 이 지점이 끝나는 위치까지를 전체 눌린면으로 보고 그 이후에 연성파단이 일어난 것으로 보았다. 이는 상부에서 행정 0.305mm되는 지점이다.

3.3 유한요소해석 모델링

앞서 전단성형가공한 조건으로 유한요소해석을 수행하였다. 적용된 소재는 납(Pb)이며, 소재의 특

성상 상온(22℃)에서의 가공은 열간가공이므로 유동응력³은 식(2)를 이용하였다.

$$\sigma = C(\dot{\epsilon})^m \quad (2)$$

여기서 $\dot{\epsilon}$ 변형률, C 는 재료 상수, m 은 실험 상수이다. 물성치는 알려진 값들로 변형률이 각각 0.115, 2.66일때 $\sigma = 13.78(\dot{\epsilon})^{0.040}$, $\sigma = 27.56(\dot{\epsilon})^{0.055}$ (MPa)이며, Fig. 9과 같이 나타낼 수 있다.

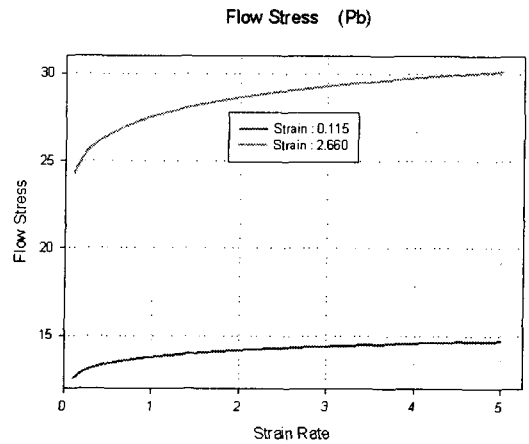


Fig. 9 Flow stress vs Strain rate curves

편치와 다이는 각각 강체로 고려하였다. 소재와 공구 접촉면에서의 마찰은 냉간 성형으로 보고 0.12로 두었다. 편치와 다이 사이의 클리어런스는 소재 두께의 7.5%인 0.075mm로 두었다. Fig. 10은 해석을 위한 초기 모델링이다.

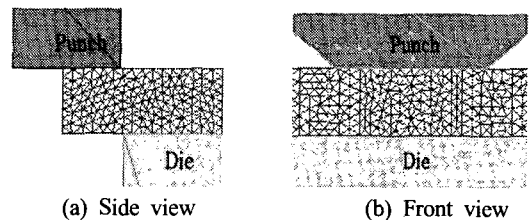


Fig. 10 Initial shear forming system

3.4 연성파단 값의 선정

DEFORM을 이용하여 전단성형가공이 진행됨에 따른 최대 연성파단 값의 위치가 소재 표면으로부터 행정 0.305mm되는(3.2의 전단성형가공을 통한

실험값) 지점에서의 연성과단 값을 구하였다. Fig. 11에 노드(Node) 8426번에서 최초의 최대 연성과단 값을 가지고 있음이 확인 된다. 초기 위치 좌표값이 (0.829687, -0.0601526, -54)임을 감안할 때 DEFORM의 연성과단 값과 행정을 비교하여 정리하면 Table 1과 같다.

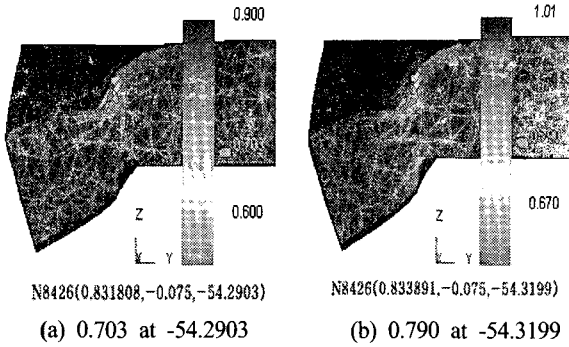


Fig. 11 Critical damage value

Table 1 Calculation of Critical Damage Value

Stroke	Damage Value	비 고
0.290	0.70	Simulation
0.305	0.75	Experiment
0.320	0.79	Simulation

Table 1은 행정이 0.290mm, 0.319mm일때 각각의 연성과단 값을 시뮬레이션을 통해 얻었고, 행정이 0.305mm일때 임계 연성과단 값 0.75를 구하였다.

3.5 요소망의 재구성⁶

전단성형가공에 영향을 미치는 인자에 대해 유한요소 해석을 수행하였다. 어떤 특성 요소의 연성과단 값이 파괴 기준에 일치하면 수치 해석적으로 이 요소를 제거함으로써 전단 공정의 파괴 현상을 진행시켜 나갔다. 이는 물리적으로 특별한 의미를 갖지는 않으며 파괴현상을 수치 해석적으로 구현하는데 가장 간편하기 때문에 이러한 방법을 선택하였다.

요소 제거 기법의 전체적인 과정은 Fig. 12과 같다. 즉 한 스텝(step)이 진행되었을 경우 데이터베이스(Database)에서 연성과단 값을 추출하여 해당 기준을 초과하는 요소를 선정한 뒤 이 요소는 파괴가 일어난 것으로 간주하여 제거하고 다시 제거 후의 기하학적인 형상(geometry)을 그려낸 뒤 여기서 다시 요소 망을 재구성하여 진행한다.

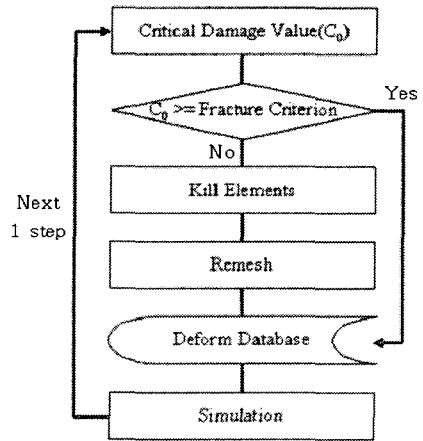


Fig. 12 Flow chart of kill elements method

3.6 유한요소해석

전단성형가공에 영향을 미치는 인자에 대해 유한요소 해석을 수행하였다. 인자에는 펀치와 다이의 클리어런스와 펀치의 속도를 달리 하였다. 클리어런스는 두께의 7.5%, 15% 즉, 0.075mm와 0.15mm로 하였다. 펀치의 속도는 기계프레스의 동일한 250spm에 행정을 60mm, 30mm, 15mm로 변화를 주었다. 유한요소해석 공정 조건을 Table2와 같이 하였으며, 기본조건은 클리어런스 0.075mm, 행정 30mm이다.

Table 2 Process condition for FEM of shear forming

Clearance	0.075mm, 0.15mm
Punch speed	250spm : Stroke 60, 30, 15mm
Critical damage value	0.75

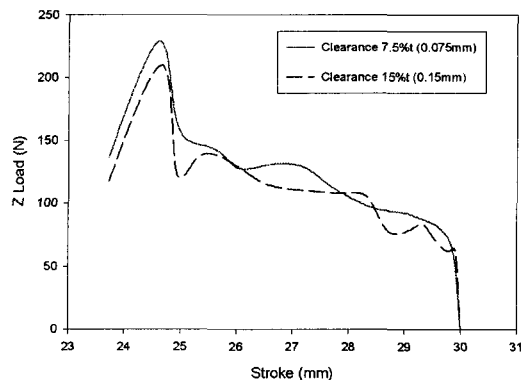
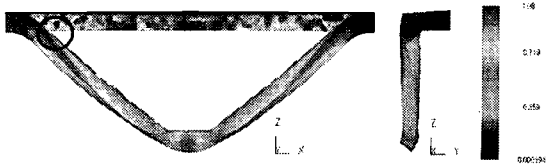
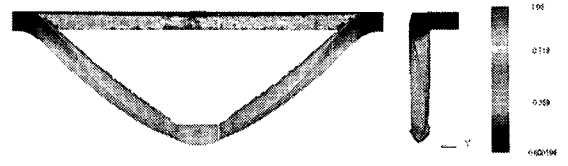


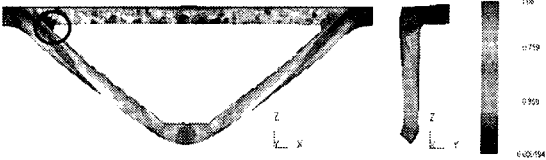
Fig. 13 Load vs Stroke Curves



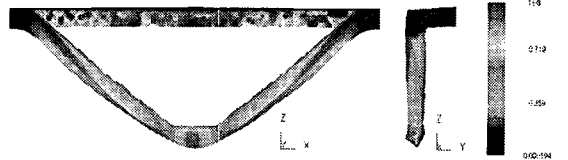
(a) Clearance 0.075mm



(a) Stroke 60mm

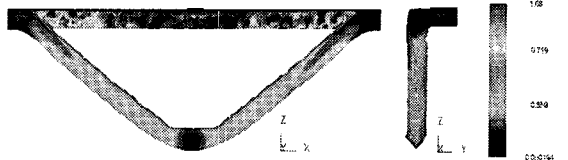


(b) Clearance 0.15mm



(b) Stroke 30mm

Fig. 14 Effective Strain



(c) Stroke 15mm

Fig. 17 Effective Strain

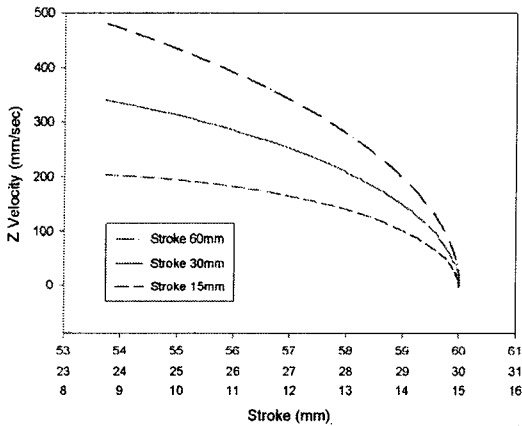


Fig. 15 Velocity vs Stroke Curves

3.7 해석결과에 대한 고찰

첫째, 행정이 30mm이고, 클리어런스가 0.075 mm, 0.15mm일때 전단성형가공시 펀치에 미치는 각각의 하중을 Fig. 13에서 보여 준다. 클리어런스가 7.5%일때 보다 15%일때 전체적으로 적은 하중이 작용된다. 반면 Fig. 14에서 알 수 있듯이 클리어런스가 큰 경우 제품의 뒤틀림 현상이 커지며, 전반적으로 다양한 변형률을 보이고 있다. 이는 제품의 품질을 저하시키는 요인이 된다. 특히 Fig. 14(b)에서 마지막으로 전단되는 양 끝을 보면, 클리어런스가 크기 때문에 전단되지 못하고 큰 값의 변형률로 남아 있는 부분이 보인다. 이런 부분은 배터리 충·방전시 단락되어, 전기의 흐름을 고르지 못하게 하는 요인이 된다.

둘째, Fig. 15은 클리어런스가 0.075mm이고, 속도가 250spm에 대해 각각 60mm, 30mm, 15mm일때의 펀치 가공 속도 그래프이다. 각각의 다른 가공 속도에 대해 Fig. 16에서는 전단성형가공시 펀치에 작용하는 하중곡선을 보여준다. 동일한 spm에 대해 속도가 적을 때 전단성형가공시 적은 하중이 작용된다. Fig. 17를 보면 속도가 적을 때 뒤틀림 현상이 현저히 줄어들었으며, 더 고른 변형률을 보인다.

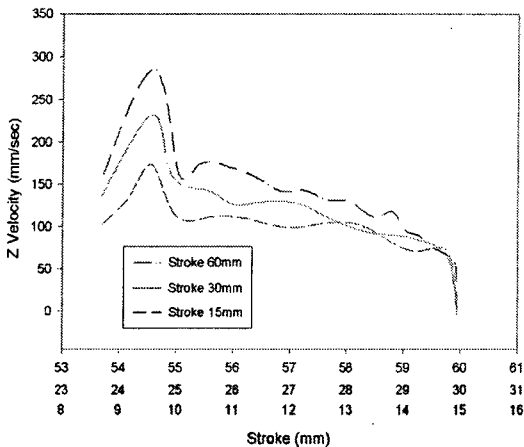


Fig. 16 Load - Stroke Curves

4. 결론

전단성형가공을 이용하여 납 배터릿기판 격자의 생성 방법 및 유한요소해석을 통해 전단성형가공 조건 변수에 따른 특성을 파악하고자 하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 판재의 전단성형가공 해석시 전단성형가공 면의 특성에 의한 임계 연성파단 값을 찾는 방법을 제시하였다.
- (2) 전단성형가공시 클리어런스가 작을 경우 제품의 뒤틀림 현상이 적어지는 반면, 편치에는 큰 하중이 작용하므로 편치 끝의 마모가 클 것으로 보인다. 클리어런스가 클 경우 가공 마지막 단계에서 큰 변형률을 가진 소재의 일부분이 남을 가능성이 있으며, 이는 제품의 성능을 저하 시킬 수 있다. 클리어런스는 소재 두께의 10% 정도로 한다.
- (3) 편치의 가공 속도가 느릴 경우 제품 형상의 뒤틀림 현상이 적어지며, 소재에는 균일한 변형률을 보인다. 또한 편치에는 적은 하중이 작용된다. 반면 전단면의 가공정도에 대해선 본 연구에서 수행된 유한요소해석으로는 판단하기 어려우며 전단성형가공 후 단면 SEM 촬영을 통해 추가 분석이 필요하다.
- (4) 본 연구에서 사용된 제품의 경우와 같은 전단성형가공은 2차원 해석만으론 제품의 형상을 예측하기가 힘들며, 본 연구에서 수행된 임계연성파단 값과 요소 제거에 의한 3차원 해석을 통해 유사한 전단 가공에 유용하게 적용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 지식기반기계 부품·소재 연구개발 클러스터사업단의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Lee, C. M., Kim, D. S., "Development of a New Manufacturing Process of Grid for Lead-Acid Battery," Fall conference of KSPE, pp. 154, 2003.
2. Park, S. Y., "Press metallic pattern design," Seonhak, pp. 33~44, 2002.
3. Taylan, Altan, Oh, S. L., Harold, L. Gegel, "Metal

- Forming Fundamentals and Applications," American Society for Metals, pp. 44~70, 1983.
4. Oh, S. I., Chen, C. C. and Kobayashi, S. "Ductility fracture in axisymmetric extrusion and drawing: Part2-Workability in extrusion and drawing," J. Engine Ind, Vol. 104, pp. 91~96, 1979.
5. Park, D. I., Kim, B. M., Ko, D. C., "Application of Critical Damage Value to Continuous Drawing process using FEM," Fall conference of Transaction of Material Processing, pp. 291~295, 2003.
6. Ko, D. C., "Finite Element Simulation of Sheet Metal Shearing by the Element Kill Method," Journal of KSPE, Vol. 13, No. 11, pp. 114~123, 1996.
7. Kwak, I. K., Sgin, Y. S., "Some Remarks on the Experiment and Finite Element Analysis to Evaluate to Forming Limit of Sheet Metals," Transaction of Material Processing, Vol. 9, No. 4, pp. 379~388, 2000.